

## СЕКЦИЯ 2. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

УДК 669.255

**Ю. Н. Оленева<sup>\*</sup>, О. А. Оленева, С. Л. Демаков**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург

<sup>\*</sup>*olenevajull@gmail.com*

### ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДОВ РЕШЕТКИ ТИТАНОВОГО МАРТЕНСИТА ПРИ НАГРЕВЕ

В статье представлены результаты исследования титановых образцов сплава ВТ8, ВТ14 и модельного сплава Ti–4,8Al–0,9Mo–2,3V–0,35Cr–0,2Fe (23/2), и Ti–8Mo методом рентгеноструктурного и терморентгеновского фазового анализа определена взаимосвязь между ромбичностью решетки, анизотропией термического расширения и молибденового эквивалента.

*Ключевые слова:* титан, титановый сплав, мартенсит, ТКЛР, РСФА.

**Y. N. Oleneva, O. A. Oleneva, S. L. Demakov**

### THE RESEARCH OF CHANGED LATTICE PERIODS OF THE TITANIUM MARTENSITE ON HEATING

By the methods of the X-ray and thermal XRD phase analyses and transmission electronic microscope the phase structure of a titanium alloy VT8, VT14, model alloy Ti–4,8Al–0,9Mo–2,3V–0,35Cr–0,2Fe (23/2) and Ti–8Mo was studied. Communication between of the martensite crystal lattice and coefficient of thermal expansion (CTE), and molybdenum equivalent.

*Keywords:* titan, titanium alloy, martensite, CTE, XRD.

Последнии годы вызывают повышенный интерес титановые сплавы, обладающие структурой мартенсита. Для них открываются новые области применения, связанные с эффектом памяти формы. Этот эффект связан с термическим поведением решетки мартенсита в циклах нагрева и охлаждения.

В данном исследовании поставлены задачи получить различные виды мартенсита, отличающиеся ромбичностью решетки, и проверить наличие взаимосвязи между ромбичностью решетки и анизотропией термического расширения как объемного, так и по отдельным осям орторомбической и гексагональной решеток и молибденового эквивалента.

Материалами исследования были выбраны образцы сплава ВТ8, ВТ14 и модельного сплава Ti–4,8Al–0,9Mo–2,3V–0,35Cr–0,2Fe (23/2) и Ti–8Mo, химический состав представлени в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав (масс. %) [1], алюминиевый и молибденовый эквивалент титановых сплавов [2]

Сплав	Ti	Al	Mo	Fe	C	O	Zr	Cr	V	[Al] экв., вес %	[Mo] экв., вес %
Ti–8Mo	осн.	0,2	7,3	0,1	0,01	0,16	–	–	–	2,1	7,6
ВТ14		5,8	3,3	0,11	0,1	0,15	0,3	–	1,8	7,6	4,8
23/2		4,8	0,9	0,2	0,1	0,18	–	0,35	2,3	7,8	3,5
ВТ8		6,1	3,2	0,14	0,1	0,16	0,5	–	–	9,2	3,5

Для получения различного типа мартенсита исследуемые образцы были подвергнуты нагреву до температуры 1050 °С, затем закалке в воду. В рентгеновской термокамере образцы нагревались ступенчато на температуру 350 °С – сплавы ВТ8 и 23/2; на температуру 390 °С – Ti–8Mo и на 300 °С – ВТ14. На рис. 1 представлена термообработка образцов.

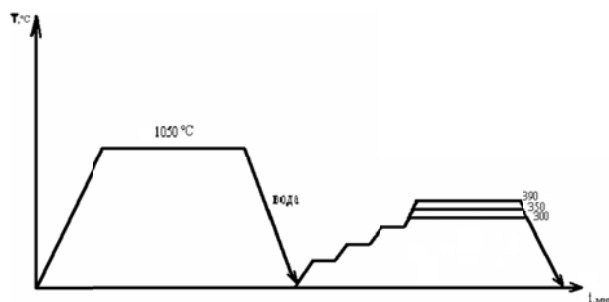


Рис. 1. Схема термической обработки образцов

Рентгеновский и терморентгеновский анализ проводился на установке BRUCKER Advance D8 со встроенной электропечью на вертикальном  $\theta$ – $\theta$  – гониометре в угловом диапазоне  $2\theta = 34...88$  °С в  $\text{Cu K}_\alpha$  – излучении и в угловом диапазоне  $2\theta = 35...100$  °С в  $\text{Co K}_\alpha$  – излучении. Терморентгеновский анализ проводился с нагревом до 350 °С, съемка осуществлялась на нагрев с шагом 20 °С.

На рис. 2 для наглядности приведены данные РСФА всех сплавов. При относительно низком молибденовом эквиваленте на дифрактограмме присутствуют только линии соответствующие решетке ГПУ (сплав 23/2). При увеличении эквивалента можно наблюдать некое раздвоение линий, что характерно для орторомбической решетки мартенсита титана. Линия

100 разделяется на две линии  $\alpha''$  – мартенсита (110 и 020), линия 101,  $\alpha'$  – мартенсита – 111 и 021, а линия 102 – 112 и 022. Данное удаление линий друг от друга характерно в случае увеличения ромбичности решетки мартенсита [3]. Сплав VT8 несколько выделяется, явного раздвоения нет, но есть не симметричность линий, что хорошо видно на линии 100 и 101.

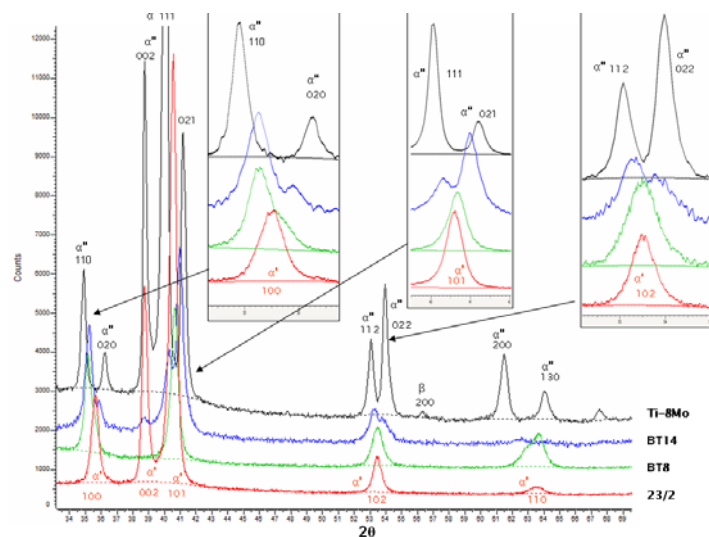


Рис. 2. Дифрактограмма образцов

В ходе исследования было получено 4 разновидности решетки мартенсита: с относительно высокой ромбичностью (Ti–8Mo), орторомбический мартенсит с низкой ромбичностью (BT14), орторомбический мартенсит с ромбичностью близкой к нулевой (BT8), ГПУ-мартенсит с нулевой ромбичностью (модельного сплава 23/2).

Изучение изменения периодов решетки мартенсита при нагреве.

Дифрактограмма, полученная в камере нагрева, приведены на рис. 3. На рисунке присутствуют линии отвечающие орторомбическим решеткам титанового  $\alpha''$  мартенсита.

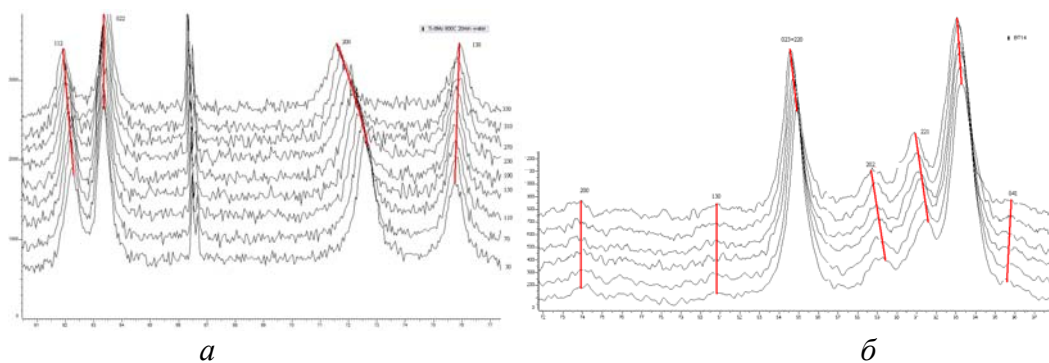


Рис. 3. Участки дифрактограмм сплава а – Ti–8Mo, б – BT14

Нагрев образцов приводит к изменению положений линий на дифрактограмме [2]. В следствие термического расширения, периоды решетки увеличиваются, что приводит к смещению линии в сторону меньших углов  $2\theta$ . В данном случае, подобное смещение демонстрируют смещение артефактных линий (рис. 3, *a*). Линии, соответствующие решеткам 112 и 200, также смещаются в сторону меньших углов, но при этом линия 200 смещается сильнее, чем 112. Линии 132 и 130, наоборот, показывают смещения в сторону больших углов, что является не характерно для поведения большинства решеток при нагреве и свидетельствует о том, что по крайней мере один из периодов решетки уменьшается при нагреве [4].

На дифрактограмма сплава 23/2 (рис. 4, *a*), мартенсит которого имел гексагональную решетки, наблюдается процесс термического расширения характерного для гексагональной решетки  $\alpha'$  – мартенсита. Нагрев образца привел к плавному смещению линий 102 и 110 в сторону меньших углов  $2\theta$ .

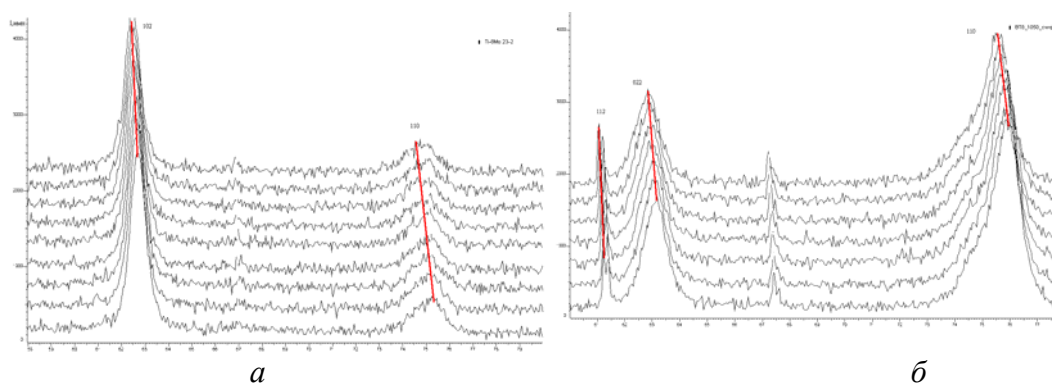


Рис. 4. Участки дифрактограмм сплава *a* – 23/2, *б* – BT8

Сплав BT8 выделяется среди исследуемых сплавов, так как в нем решетка мартенсита не является строго определенной. КТР были рассчитаны как для ГПУ решетки мартенсита. Отметим, что профили линии 110 при  $T_{ком}$  до нагрева и при  $T_{max}$ , заметно отличаются, становятся шире, и сохраняют несимметричность в ходе нагрева. То есть поведение в целом ближе к поведению модельного сплава 23/2, но более детальный анализ дифрактограмм показывает изменение конфигурации линии 110, за счет ее уширения при нагреве, и обратного сжатия при охлаждении. Линия 110,  $\alpha'$ -мартенсит, ведет себя как будто 2 линии 200 и 130,  $\alpha''$ -мартенсита, на некотором расстоянии друг от друга. Провести корректное разделение линий не удалось, для этого требуется более тонкий эксперимент. Структура мартенсита обладает некоторой ромбичностью. но в целом данное такое

расширение линий скорее характерно для орторомбической, чем для гексогональной решетки мартенсита[4].

Средний коэффициент термического расширения приведены в таблице 3, значения сплава ВТ8 по осям решетки несколько выделяется из ряда исследованных сплавов.

Таблица 2

Термические расширения образцов

Сплав	$\alpha_{та}, 10^{-6},$ $K^{-1}$	$\alpha_{тб}, 10^{-6},$ $K^{-1}$	$\alpha_{тс}, 10^{-6},$ $K^{-1}$	$\alpha_t, 10^{-6},$ $K^{-1}$	[Al] экв., вес %	[Mo] экв., вес %
Ti-8Mo	40	-19	6	8	2,1	7,6
BT14	23	-5	9	9	7,6	4,8
23/2	16	—	7	13	7,8	3,5
BT8	10	—	11	10,3	9,2	3,5

При оценке влияния молибденового эквивалента на изменения решетки при нагреве, можно заметить, что при равном значении молибденового эквивалента, некоторое влияние играет и алюминиевый эквивалент на анизотропию термического расширения.

Таким образом можно сделать выводы:

1. Установлено, что при закалке сплавов Ti-8Mo и BT14 образуется орторомбический мартенсит ( $R = 1,048$  и  $R = 1,038$  соответственно), в сплаве 23/2 – гексагональный мартенсит ( $R = 1$ ), в сплаве BT8 образуется мартенсит обладающий характерными признаками как для орторомбического, так и гексагонального решетки ( $R \approx 1$ ).

2. Установлено, что термическое расширение мартенсита обладает ярко выраженной анизотропией по направлениям кристаллической решетки. Коэффициент расширения по оси  $a$  превышает коэффициент по осям  $b$  и  $c$ . Коэффициент термического расширения по оси  $b$  в сплавах Ti-8Mo и BT14 показал отрицательные значения. Анизотропия термического расширения снижается при уменьшения молибденового эквивалента сплава.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник / А. А. Ильин, Б. А. Колачев. Москва : ВИСЛС – МАТИ, 2009. 520 с.
2. Колачев Б. А. Материаловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, В. Ф. Ливанов, В. А. Елагин. Москва : МИСИС, 2001. 416 с.
3. Илларионов А. Г. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. Екатеринбург : Урал, 2014. 137 с.
4. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов / М. В. Мальцев. Москва : Металлургия, 1970. 368 с.